

二軸スライディングメッシュ法による可動物体周り流れのシミュレーション Simulation on Flows around the Movable Body using Biaxial Sliding Mesh Approach

- 近口 諭史, 京工繊大, 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町
 山川 勝史, 京工繊大, 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町
 松野 謙一, 京工繊大, 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町
 Satoshi Chikaguchi, Kyoto Inst. Tech., Hashikami-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto
 Masashi Yamakawa, Kyoto Inst. Tech., Hashikami-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto
 Kenichi Matsuno, Kyoto Inst. Tech., Hashikami-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto

Calculating flow around the movable body is important and interesting. However, most approaches developed already to calculate such flow require much time. Therefore, in this study, we develop new calculation method called *biaxial sliding mesh approach* having small time required for calculation. In this paper, first of all, we solve shock tube problem by Euler equations and calculate flow around sphere by Navier-Stokes equations using the biaxial sliding mesh approach to confirm that flow comes well at sliding planes. Next we simulate flow around tilt rotor aircraft when it takes off and convert the flight mode and around bicycle when we ride it using this approach to show its usefulness. As a result, what we become able to analyze flows around the movable body in less time was shown.

1. 緒言

数値シミュレーションにおいて、ヘリコプターの回転翼のような可動部分を有する物体の流体計算は広い分野で活用できることから非常に重要であり、多くの研究報告がなされてきた。従来の計算では、可動部分をモデル化し、簡易計算法の結果を体積力などの形で計算の取り込む手法が一般的であるが、解析できる場所に限られるという欠点がある。この問題を解決するためには、可動物体周りに格子を作成し直接計算する必要があるが、良好な格子形状を保つことは困難であるため取り扱いが難しい。この問題を解決するための手法として、引っ張りばね系を模擬した移動格子法⁽¹⁾などが開発されたが、多くの計算時間を必要とするという欠点を持っている。そこで、本研究ではこのような解析でも良好な格子形状を保ち、計算コストが小さい新たな計算手法として二軸スライディングメッシュ法を提案し発展させた。

本論文では非粘性流体解析と粘性流体解析の両者の場合でそれぞれ検証を行い、本手法が粘性の有無に関わらず適用できることを示す。更に、本手法の有用性を示すために応用計算として大変形を伴う可動部を有する物体の流体計算を行う。非粘性流体解析における応用計算としては、ティルトローター機の離陸及びモード変換のシミュレーションを行う。ティルトローター機は回転翼を傾けることで飛行モードを変化させることができる航空機であり、モード変換時は非常に興味深い流れ場が生じていると考えられるが、従来の手法ではこの変形を再現した流体計算を低コストで行うことは容易ではない。それ故、本手法の有用性を示すための計算対象としては適していると言える。一方、粘性流体解析における応用計算としては、ペダリングを伴う自転車周りの流体計算を行う。その際、本手法は脚部の動きの再現に利用する。脚部を動かさないモデルでの流体計算は既に多くされてきたが、ペダリングの動きを再現する場合は物体の大変形への対応が課題となっており、あまり報告されていない。

2. 基礎方程式

本研究では二軸スライディングメッシュ法が非粘性流体解析及び粘性流体解析の両方で適用できることを示す。そこで、非粘性流体解析では式(1)で表される3次元 Euler 方程式を、粘性流体解析では式(2)で表される3次元 Navier-Stokes 方程式を用いる。

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial \mathbf{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

3. 数値計算法

3.1 非構造移動格子有限体積法

計算には非構造移動格子有限体積法⁽²⁾を用いる。離散化は時間・空間を含めた4次元の検査体積を用いて行う。

3.2 移動計算領域法

これまで著者らは移動計算領域法⁽³⁾ (MCD法) を提案してきた。移動格子有限体積法⁽⁴⁾をベースとしたこの手法は、Fig.1のように計算領域全体を物体と共に移動させる手法であり、計算格子を変形させることなく自由に物体を移動させることが可能である。

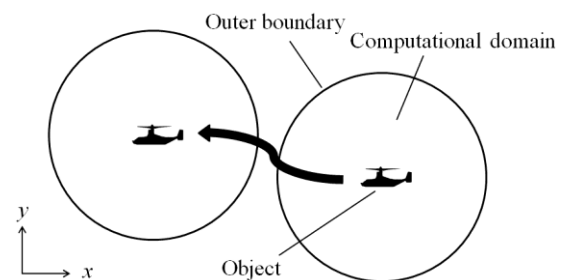


Fig. 1 Moving Computational Domain Method

3.3 二軸スライディングメッシュ法

新たに開発する本手法は Fig.2 のように複数のスライド面で囲まれた領域を2つの軸で回転させることで物体の大きな変形を再現する手法である。この手法は、計算時間が小さいが格子移動の制限が大きい特徴を持つスライディングメッシュ法を、より自由な動きが再現できるように拡張したものである。これにより、大きな変形をする物体周りの流体解析が短時間で可能となる。尚、本研究ではスライド面での物理量の補間は隣接要素との隣接面積に基づいて行う。

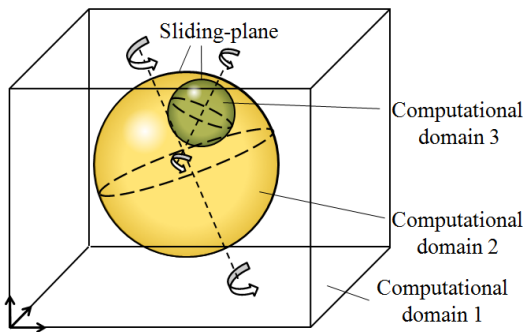


Fig. 2 Biaxial Sliding Mesh Approach

4. 二軸スライディングメッシュ法の検証

4. 1 非粘性流体解析における検証

まず非粘性流体における計算においてスライド面で物理量が良好に伝達されることを確認する。その為に、Fig.3のように直方体の内部に、大小2つの円柱型に分割された領域を持つ格子を用意し、分割した領域を本手法によって回転移動させながら衝撃波管問題の計算を行う。また、本研究では非粘性流体解析の場合、擬似時間内部反復法には2段階有理ルンゲ=クッタ法を用いる。尚、本検証及び以降の計算の格子生成にはMEGG3D^(5,6)を用いた。

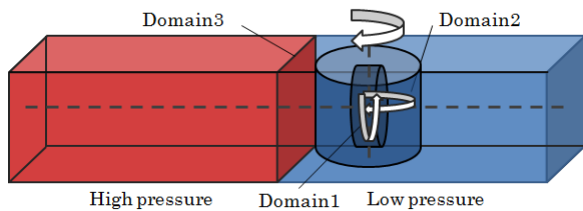


Fig. 3 Summary of verification (shock tube problem)

4. 1. 1 計算条件

初期条件として静止流体の高圧側に密度 1.0, 低圧側に密度 0.1 を与え、2つの円柱型の領域は共に角速度 1.0 で回転させる。境界条件は、全ての面で反射境界とした。

4. 1. 2 計算結果

$t=0.5$ における角柱の軸中心での密度分布を Fig.4 に示す。回転する円柱を通り過ぎた衝撃波は鋭さを失っておらず、また厳密解とも良好に一致していることが確認できた。これにより、スライド面において物理量が良好に伝達されていることが示された。

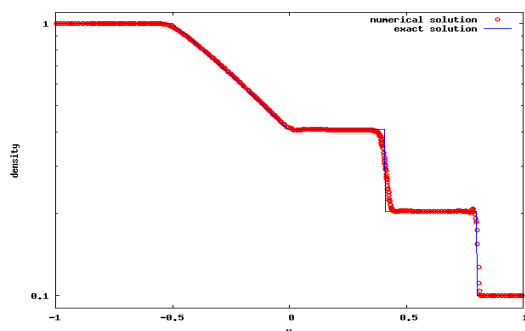


Fig. 4 Density distribution at $t=0.5$

4. 2 粘性流体解析における検証

次に流体を粘性流体とした場合の計算において、境界層を含む

スライド面で物理量が良好に伝達されることを確認する。その為に、Fig.5のように本手法により回転する格子を表面付近に持つ球周りの流れ場を計算する。また、本研究では粘性流体解析の場合、擬似時間内部反復法にはLU-SGS 陰解法を用いる。

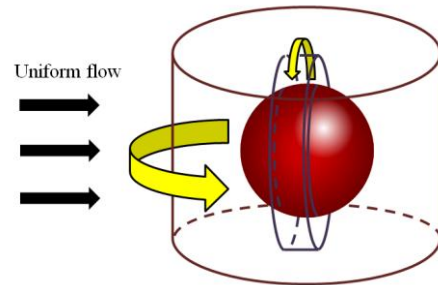


Fig. 5 Summary of verification (flow around the sphere)

4. 2. 1 計算条件

流す一様流の速度は 0.1 とし、レイノルズ数は 1.0×10^4 とし、2つの円柱型の領域は共に角速度 1.0 で回転させる。また、物体表面では滑りなし境界条件とした。

4. 2. 2 計算結果

計算結果として $t=400$ における球周りの速度分布を Fig.6 に示す。これより、スライド面で物理量が良好に伝達されていることが確認できた。また、スライド面上の境界層部でも定性的ではあるが問題なく物理量が伝達されていることがわかる。

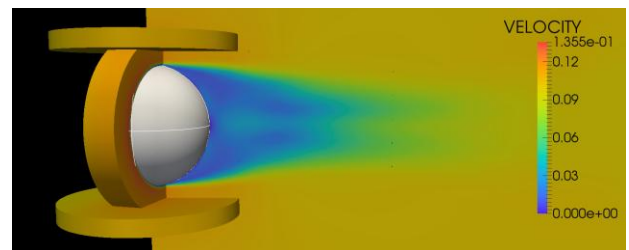


Fig. 6 Velocity distribution around the sphere

5. 二軸スライディングメッシュ法の応用

5. 1 非粘性流体解析への適用例

二軸スライディングメッシュ法をティルトローター機の離陸・モード変換時における機体周り流れの数値計算に適用し、本手法の有用性を示す。尚、流体は非粘性流体とする。

5. 1. 1 二軸スライディングメッシュ法の適用方法

二軸スライディングメッシュ法をモード変換するティルトローター機に適用させる場合は、Fig.7のように回転翼とエンジンナセルの周りの計算格子を円柱形状で領域分割し、エンジンナセル部を含む計算領域(Domain2)を、回転翼部を含む領域(Domain1)ごと回転させる。ただし、Domain2のスライド面が胴体部と重なることを防ぐために、胴体を避けるようにスライド面を凹ませる。また固定翼がエンジンナセルと共に回転してしまうことを防ぐためにDomain2を固定翼周りだけ円柱型でくり抜いた形状にする。さらに、Fig.8のように機体から離れた外部領域も円柱型に領域分割し、それぞれの領域の格子を本手法を用いて動かすことで、地面からの離陸を格子を潰すことなく再現する。

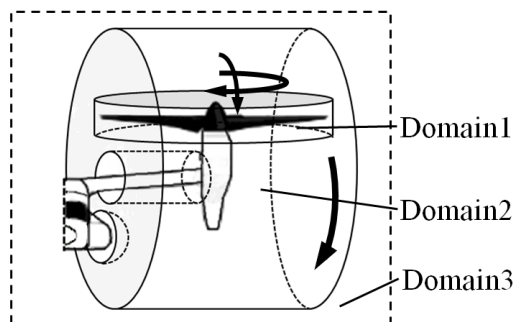


Fig. 7 Division of domain and sliding plane (tilt rotor aircraft)

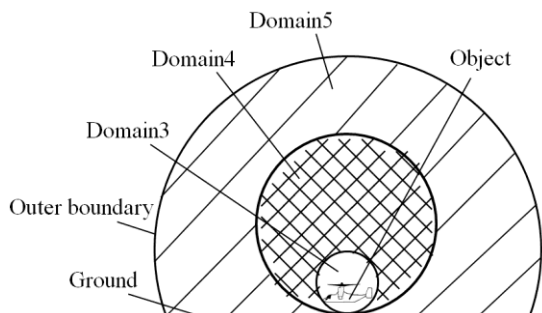


Fig. 8 Division of domain for takeoff

5.1.2 計算条件

境界条件は物体表面で移動反射境界, 対象面でシムメトリ境界, 外部境界でリーマン境界とした. また, 機体データは公開されている V-22 のデータ⁷⁾を参考に, 機体の質量を 21545kg, 回転翼の角速度を 397rpm, モード変換時のエンジンナセルの角速度を 1.327rpm とした. また, 計算コスト削減のため, 流れは左右対称と見なし, 左半分のみ計算を行う.

5.1.3 飛行条件

計算は地面付近からヘリモードで垂直離陸 (VTO) し, 高さ 1.0m まで上昇した後, エンジンナセルの角度を 10 度にし, 機首下げ状態で上昇と前進を同時に行い, 前進速度が 40knot ($u = 0.06$) に達した時点で, 機体を水平または機首上げ状態を保ちながら, 高度を維持しつつ固定翼モードにモード変換する. その際, 物理法則に従った軌道で飛行するために, 1 時間ステップごとに機体にかかる空気力を求め, その空気力をもって物体の運動方程式と連成し, 次の時間ステップにおける機体の軌道と姿勢を求める.

5.1.4 計算結果

飛行中の流れ場を可視化したものを Fig.9 に示す. Fig.9 はエンジンナセルの傾斜角度が 0, 10, 45, 90 度の時の機体の表面圧力と速度勾配テンソルの第二不変量 Q 値の等値面を示している. ここで固定翼部の圧力分布に着目すると, ヘリモード時はダウンウォッシュにより固定翼上部が高圧になっており, 揚力を得る足枷となっているが, エンジンナセルの傾斜が浅くなるにつれて固定翼上部で低圧になり固定翼で揚力が得られていることがわかる. 次に Q 値の等値面に着目すると, ヘリモードから固定翼モードへモード変換する間で等値面の形状が複雑に変化していることがわかる. これより, モード変換時のティルトローター機のような大きな変形を有する物体周りの非粘性流体解析が, 本手法により可能になることが確かめられた.

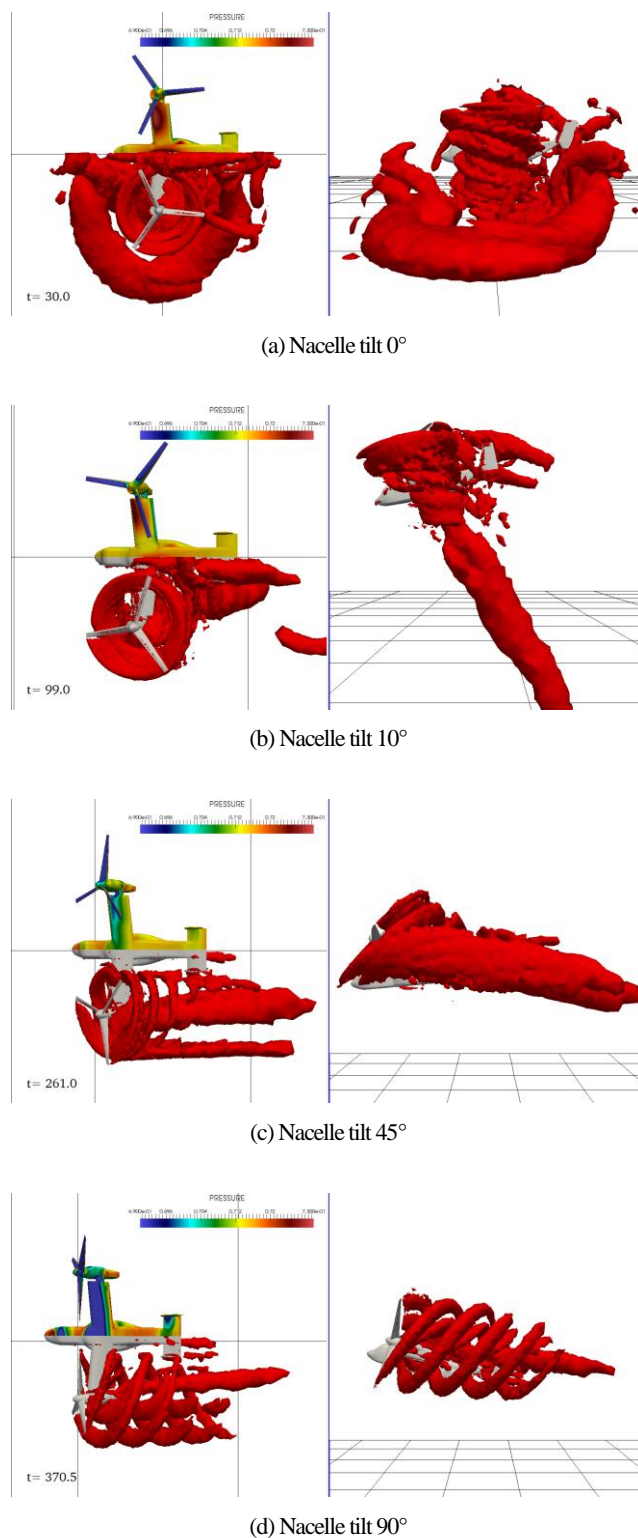


Fig. 9 Surface pressure and isosurface of Q

5.2 粘性流体解析への適用例

次に二軸スライディングメッシュ法を粘性流体解析に適用する。粘性流体解析の場合、ティルトローター機周りの流体解析ではレイノルズ数が非常に高く、流れも左右対称とみなせないため、二軸スライディングメッシュ法とは無関係のところでも非常に多くの計算格子を必要としてしまう。それ故、計算コストも膨大になってしまい、本手法の適用例としては不適切である。そこで、適用例としてティルトローター機ではなく、ペダリングを伴う自転車の走行運動の流体解析を行う。ペダリングを伴う走行中の自転車も複雑で大きな変形部を有し、特殊な手法を用いない限り、流体解析は非常に困難である。また、この動きは反復運動であり、ティルトローター機と同じく本手法と非常に相性が良い計算対象と言える。

5.2.1 二軸スライディングメッシュ法の適用方法

ペダリング時の脚部及びクランク部の動きを再現するために、本手法を用いる。適用方法はティルトローター機の場合と同様に、Fig.10 のように円柱型の領域に分割し、2本の軸で回転移動させる。ただし、軸の向きは平行とする。

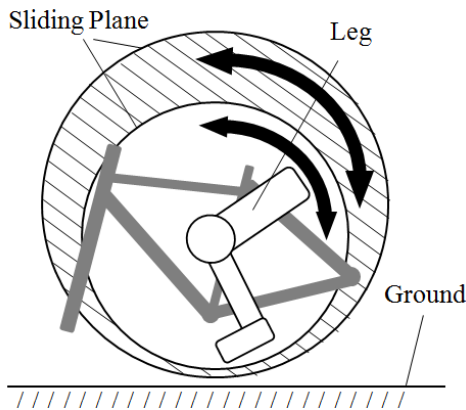


Fig. 10 Division of domain and sliding plane (bicycle)

5.2.2 計算条件

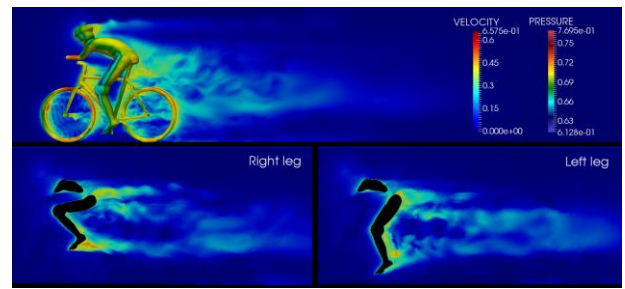
境界条件は物体表面で滑りなし条件、外部境界でリーマン境界とした。走行速度は 50km/h、レイノルズ数は 1.7×10^6 、自転車のギア比を 3 とした。

5.2.3 計算結果

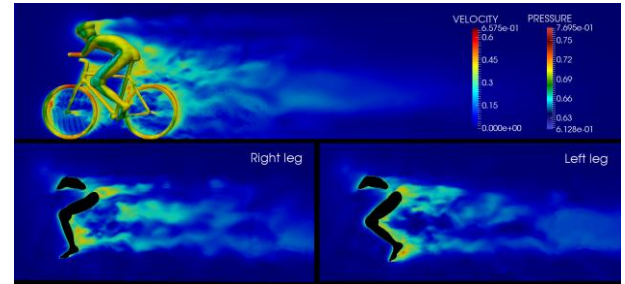
走行中の流れ場を可視化したものを Fig.11 に示す。この図は胴体中心、右脚、左脚を含むそれぞれの断面での速度分布、及び物体の表面圧力を示す。これより、ペダリングを伴う自転車のような複雑で大きな変形を有する物体周りの解析が、粘性流体解析でも本手法により可能になることが確かめられた。

6. 結言

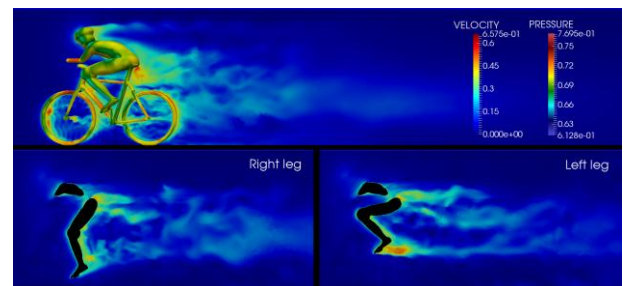
本論文では複雑な物体の動きに伴う流れを捉えるために、新たな手法として二軸スライディングメッシュ法を提案・発展させた。非粘性流体解析及び粘性流体解析におけるそれぞれの検証により、粘性の有無に関わらず十分な精度で計算できることを示した。また、特に回転+大変形を伴うティルトローター機や自転車周りにおける高精度計算を完遂させたことから、本手法の有用性を示すことができた。



(a) Crank angle 90°



(b) Crank angle 180°



(c) Crank angle 270°

Fig. 11 Velocity distribution around the bicycle

参考文献

- (1) Batina, J.T., "Unsteady Euler Algorithm with Unstructured Dynamic Mesh for Complex-Aircraft Aerodynamic Analysis," AIAA Journal, Vol.29, No.3, pp.327-333, 1991.
- (2) 山川勝史, 松野謙一, "非構造移動格子有限体積法 (第一報, 非定常圧縮性流れに対する基礎的定式化と検証)," 機論, 69-683, (2001), 1577-1582.
- (3) Koji WATANABE and Kenichi MATSUNO, "Moving Computational Domain Method and Its Application to Flow Around a High-Speed Car Passing Through a Hairpin Curve," Journal of Computational Science and Technology, Vol3, No.2, 2009.
- (4) 三原清孝, 松野謙一, 里深信行, "移動格子有限体積法 (第一報, 基礎的定式化と検証)," 機論, 65-637, (1999), 2945-2953
- (5) Ito, Y. and Nakahashi, K., "Surface Triangulation for Polygonal Models Based on CAD Data", Internal Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.39, Issue 1, (2002),75-96
- (6) Ito, Y., "Challenges in Unstructured Mesh Generation for Practical and Efficient Computational Fluid Dynamics Simulations", Computer & Fluids,
- (7) 青木謙知, 徹底検証!V-22 オスプレイ, ソフトバンククリエイティブ, (2012)